

사고 선박의 예인력 계산 및 실험에 관한 연구

† 남택근 · 정창현* · 김진만** · 최혁진***

† 목포해양대학교 기관시스템공학부 교수, * 목포해양대학교 해상운송시스템학부 교수,

** 목포해양대학교 기관공학과 대학원, *** 선박해양플랜트연구소(KRISO) 책임 연구원

A Study on the Calculation of Towing Force for the Disabled Ship and Its Experiments

† Taek-Kun Nam · Chang-Hyun Jung* · Jin-Man Kim** · Hyuek-Jin Choi***

† Division of Marine Engineering, National Mokpo Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

*Division of Maritime Transportation System, National Mokpo Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

**Department of Marine Engineering, Graduate school of National Mokpo Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

***Division of Maritime Safety, KRISO, Daejeon 305-343, Korea

요 약 : 본 논문에서는 선박의 예인에 필요한 예인력의 계산과 이를 검증하기 위한 실험 결과에 대해 언급하고 있다. 먼저 예인력의 계산에 있어서는 선박의 마찰저항, 풍압저항, 조파저항을 고려하였다. 아울러 프로펠러가 고착된 상태를 가정하여 프로펠러 저항을 계산하였다. 이와 더불어 예인 시 사용되는 예인삭에 걸리는 부가저항을 노드분석법을 적용하여 계산하였고, 선체 저항과 예인삭에서의 부가저항을 합하여 최종적인 예인저항을 도출하였다. 계산된 결과값의 유효성을 검증하기 위하여 목포해양대학교 실습선 새유달호를 활용하여 해상에서 예인실험을 수행하였고 이론적인 계산 결과와 실험 결과에 대한 비교를 행하였다. 소요 예인력의 이론적인 계산에서 주요한 요소는 예인속력임을 알 수 있었고, 예인속력의 증가에 따라 프로펠러 고착 저항이 저항의 주요한 부분을 차지하는 것을 확인하였다. 실제 실험을 통해서도 선박의 요잉에 의한 저항 증가분을 고려하는 것이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : 예인력, 예인삭, 예인실험, 예인속력, 요잉

Abstract : In this paper, calculation of towing force required to tow the ship and experiments to verify its appropriacy are discussed. Friction, wind and wave-making resistance of vessel are considered to calculate towing force of specified vessel. Propeller resistance is also reflected and it is assumed that the propellers are locked. Node analysis to estimate additional resistance on towline is applied. Total towing force could be obtained by adding the ship's resistance and towline resistance. Experiments with training ship SAE YU DAL was executed to check the effectiveness of calculation methods and some comparison between experiments and calculation results was also done. From the comparative analysis, we confirmed that towing speed is primary terms in the calculation of towing force and propeller resistance is a major elements of ship's resistance with the increasing of towing speed. We can see that additional resistance induced by yawing of ship during towing have to be considered for total tow resistance.

Key words : towing force, towline, towing experiments, towing speed, yawing

1. 서 론

본 연구는 선박의 예인에 필요한 예인력의 계산과 계산 결과의 유효성을 검증하기 위한 실험 결과에 대해 언급하고 있다. 해상에서 일어날 수 있는 다양한 사고로 인해 선박의 자력운항이 불가할 경우 선박을 사고 장소로부터 안전한 곳으로 이동시켜 2차적인 피해를 방지하는 것은 아주 중요하다고 할

수 있다. 사고 선박을 이동시키는 가장 대표적인 수단은 예인선이고, 예인선을 투입하여 작업할 경우 선박의 예인에 필요한 소요 예인마력을 산정하여야 한다.

선박의 예인에 필요한 소요마력계산과 장력계산에 관한 기존의 연구를 살펴보면 다음과 같다. KR, KST(2008)에서는 선박의 마찰저항(SNAK, 2009), 조파저항, 공기저항, 해상의 파고를 고려한 소요예인마력을 계산하고 있고, Choi(2012)에서

† Corresponding author : 종신회원, tknam@mmu.ac.kr 061)240-7225

* 종신회원, hyon@mmu.ac.kr 061)240-7182

** 학생회원, papa713@mmu.ac.kr 061)240-7225

*** 정회원, hjchoi@kiost.ac 042-866-3611

(주) 이 논문의 예인삭 장력 해석과 관련된 부분적인 내용은 "사고 선박의 예인장력 해석에 관한 연구"란 제목으로 "2013 공동학술대회 한국항해항만학회지논문집(해군사관학교, 2013.6.27-28, pp.180-181)"에 발표되었음.

는 선체의 기본저항 이외에 바람, 표류력, 선체표면거칠기, 선체파손, 파랑, 천수효과 등에 의한 영향을 고려하여 예인 저항을 도출하고 있다. 한편 Nam(2012)에서는 마찰저항, 공기저항, 조파저항, 프로펠러 고착저항을 고려하여 저항을 계산하고, 다항식 맞춤법을 적용하여 예인삭에 걸리는 부가저항을 함께 고려하고 있다.

KR, KST(2008)의 결과는 계산과정은 간단하나 프로펠러 고착 및 예인삭의 부가적인 저항에 발생하는 장력에 대한 계산은 행하지 않고 있으며, Choi(2012)는 다양한 부가저항 성분을 고려하여 면밀하게 예인저항을 도출하고 있으나 많은 항목들을 고려하여야 하는 관계로 계산과정이 복잡하며, 예인삭의 부가저항 또한 고려하지 않고 있다. Nam(2012)에서는 이론적인 계산결과를 제시하고 있지만 실험 등을 통한 검증 결과는 언급되지 않고 있다. 위와 같이 기존 연구결과들은 예인 시 발생하는 저항의 이론적인 계산법을 제시하고 있으나, 계산 결과의 적합성에 대한 검증 또는 실험 결과에 대해서는 언급하지 않고 있다.

이에 본 연구에서는 선박의 예인 시 발생하는 저항값을 계산하고 계산 결과의 유용성을 확인하기 위해 해상에서 실제 예인실험을 수행하였다. 이론적인 계산과 실험 대상 선박으로는 목포해양대학교 실습선 새유달호(T/S SAE YU DAL)를 선정 하였다. 선박의 예인저항은 Nam(2012)의 결과를 활용하였고, 예인삭에 걸리는 부가저항은 노드분석법을 적용하여 계산하였다. 아울러 계산결과와 적합성을 확인하기 위해 로드셀, 풍향 풍속계 등을 적용한 실험 장치를 구축하였고, 구축된 데이터 계측 시스템을 활용하여 해상에서 실제 예인실험을 행하였으며 이론적인 계산결과와 실제 실험 결과를 비교 분석하였다.

2. 예인 저항 및 장력 계산

2.1 예인 저항 계산

먼저 선박의 예인에 필요한 저항은 선체의 마찰저항(R_f), 바람에 의한 저항(R_a), 조파 저항(R_w)을 고려하였고, 자력우항이 불가능한 상태로 가정하여 프로펠러의 고착 저항(R_p)을 추가하였다. 선박사고로 인해 프로펠러는 윈드밀 상태가 아닌 고착된 상태로 가정하였고, 이것은 사고선박의 예인저항값을 가능한 넓은 범위에서 예측하기 위한 것이다.

(가) 마찰저항(R_f)

마찰저항은

$$R_f = \rho \lambda S v^{1.83} \quad (1)$$

과 같이 나타낼 수 있으며 ρ 는 해수비중, λ 는 마찰계수, $S=1.7Ld+\nabla/d$ 는 선박침수면적(m^2)이며, ∇, L, d, v 는 각각

배수용적(m^3), 선박의 길이, 평균흘수, 예인속력(m/s)을 의미한다(SNAK, 2009).

(나) 바람에 의한 저항(R_a)

바람에 의한 저항은

$$R_a = \frac{1}{2} \rho_a C_a v_a^2 (A \cos^2 \theta + B \sin^2 \theta) \quad (2)$$

와 같이 나타낼 수 있고, ρ_a 는 공기밀도($0.125 \text{ kgsec}^2/m^4$)를 의미하고, C_a, v_a, A, B, θ 는 각각 풍압계수, 상대풍속(m/sec), 수선 위 정면투영면적(m^2), 수선 위 측면 투영면적(m^2), 바람의 입사각을 의미한다.

(다) 조파저항(R_w)

조파저항은

$$R_w = \frac{1}{2} \rho_w C_w B d v^2 \quad (3)$$

과 같이 나타낼 수 있고, ρ_w 는 해수밀도($104.5 \text{ kgsec}^2/m^4$), C_w, B, d, v 는 각각 유압계수, 선폭, 흘수, 선박의 속력을 나타낸다.

(라)프로펠러 고착저항(R_p)

프로펠러가 회전하지 않고 고착될 경우에 해당되는 저항으로 미국 해군 예인 매뉴얼에 의한 방법을 적용하였다(U.S. Navy, 2002). 고착저항은

$$R_p = 69.06 \frac{\pi}{4} D_p^2 a_p v^2 \quad (4)$$

로 표현가능하며, 원식을 SI단위계로 환산하였으며 프로펠러 날개는 원형 형태로 가정하였다. (4)식에서 D_p 는 프로펠러 직경, a_p 는 프로펠러의 투영면적과 전 원면적의 비율을 나타내는 투영면적비(PAR, projected area ratio)이다. 따라서 선박의 전체적인 예인저항을 R_T 라고 하면, 식(1)~식(4)로부터

$$R_T = R_f + R_a + R_w + R_p \quad (5)$$

를 얻을 수 있다(Nam, 2012). 파랑에 의한 저항 또한 중요한 성분이지만 파랑에 따른 저항값을 정확하게 계산하기 위해서는 선체의 오프셋과 해당 파랑의 파고와 주기와 입사각 등을 모두 고려하여 신속하게 계산하여야 하는 어려움이 있어 본 연구에서는 이를 고려하지 않았다.

실제 실험을 수행하기에 앞서 이론적인 예인 저항 계산을 수행하였고, 대상 선박은 목포해양대학교 실습선 새유달호로 선박 데이터는 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of vessel

Specification	T/S SAE YU DAL
LOA	102.70 (m)
LBP	93.00 (m)
B	14.50 (m)
D(Shelter/Main)	9.50/7.00 (m)
d(full loaded)	5.214 (m)
d(ballast)	(m)
G/T	3,644 (ton)
DWT	2,064.37 (ton)
Displacement(full loaded)	4,318.79 (ton)
Ballast water	442.41 (ton)
Bunker	639.31 (ton)
Fresh water	912.98 (ton)
Main engine(MCR)	3,970BHP*250rpm
Main engine(NCR)	3,374.5BHP*236.8rpm

이론적인 예인저항 계산 결과는 Table 2와 같다. 외력 조건은 실선실험(3장 참조) 조건을 고려하여 풍속은 7m/s, 유속은 0.7m/s를 적용하였고 예인속력은 SI단위계로 환산하여 계산하였다.

Table 2 Towing resistance of T/S SAE YU DAL

Velocity(kt)	3	4	5	6
R_f	0.552	0.935	1.406	1.962
R_a	0.598	0.672	0.781	0.834
R_w	0.470	0.835	1.304	1.878
R_p	0.695	1.235	1.930	2.780
$R_T = T^*$	2.315	3.677	5.421	7.454

예인속력의 증가와 더불어 전체적인 저항이 증가하는 것을 알 수 있고, 5노트 이상 영역에서는 프로펠러 고착저항이 전체저항의 35%에 달하는 것을 알 수 있다.

2.2 예인 장력 계산

2.1 절에서는 피예인선의 저항을 기준으로 하여 예인에 필요한 저항력을 계산하였고, 이와 더불어 예인선에 의한 부가저항을 고려한 전체적인 예인저항의 계산이 필요하다. Fig.1 은 예인선에 의한 예인 작업 시 피 예인선과의 예인선에 의한 연결 상태를 나타내고 있다.

Nam(2012)에서는 예인선에 걸리는 부가저항을 계산하기 위해 피타고라스의 정리(U.S.Navy, 2002)와 다항식 맞춤법을 적용하였으나 예인속력과 예인선의 동적인 영향을 살펴보기는 어렵다. 본 연구에서는 해저케이블의 장력 계산에 적용되는 노드 분석법(M.A. Vaz, 1995)을 적용하여 피 예인선과 예인선 사이의 부가 장력을 계산하였다. Fig. 2는 예인선을 n 개로 나누고 나누어진 한 요소에 작용하는 접선(tangential) 방향과 법선

(normal) 방향의 힘 관계를 나타내고 있다.

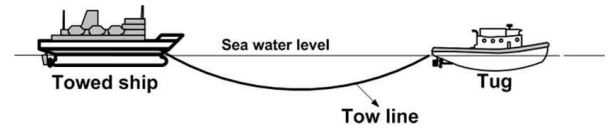


Fig. 1 Towline tension of towing

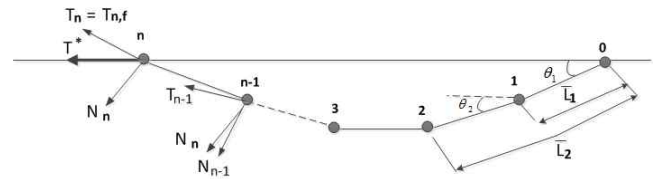


Fig. 2 Node analysis of towline

예인선의 접선방향의 힘(tangential force)과 법선방향의 힘(normal force)을 고려한 방정식은 다음 식(6)과 같이 표현 가능하다.

$$\begin{aligned} \frac{dT}{ds} + \hat{\omega} \sin\theta + \frac{1}{2} \rho C_f \pi d V_t^2 &= \rho_c A_t \quad (6) \\ T \frac{d\theta}{ds} + \hat{\omega} \cos\theta - \frac{1}{2} \rho C_d d V_n^2 &= \rho_c A_n \end{aligned}$$

단, T , $\hat{\omega}$, ρ , C_f , C_d , d , ρ_c 는 각각 접선방향의 힘, 단위 길이당 예인선 중량, 해수밀도, 접선방향과 법선방향의 마찰저항 계수, 예인선 직경, 예인선 단위 길이 당 질량을 의미한다. 아울러 V_t , V_n , A_t , A_n 은 각각 예인선의 접선방향의 속도, 가속도 및 법선방향의 속도, 가속도를 나타내고, s 는 예인선의 곡선 길이를 의미한다.

한편, 예인선의 각도변화에 의한 접선방향의 힘을 노드로 나누어서 고려하면 단위 요소 길이(L_i) 중심점에서의 법선방향의 힘(N_i)과 같다. 즉, $T \frac{d\theta}{ds} = \frac{N_i}{L_i/2}$ 와 같이 고려할 수 있으므로 (6)식으로부터 i 노드에서의 법선 방향의 힘은

$$\frac{2N_i}{L_i} + \hat{\omega} \cos\theta_i - \frac{1}{2} \rho C_d d V_{n,i}^2 = \rho_c A_{n,i} \quad (7)$$

과 같이 표현할 수 있고, L_i 는 각 예인선의 단위 노드 길이를 의미한다. 단, $i = 1, 2, \dots, n$ 이다. 한편, i 노드에서의 접선 방향의 힘은

$$\begin{aligned} \frac{dT_i}{ds} &= -\hat{\omega} \sin\theta_i - \frac{1}{2} \rho C_f \phi_d V_{t,i}^2 + \rho_c A_{t,i} \quad (8) \\ &\cong H(\theta_i) \end{aligned}$$

이 된다. (8)식의 우측항은 $\theta_i, V_{t,i}, A_{t,i}$ 를 고정하면 상수값이 되므로, s 에 대해 적분하면 $T_i(s,t) = H(\theta_i)s + G_i(t)$ 가 얻어진다. n 노드에서의 접선방향의 힘은 $T_{n,0} = T_{n,f}$ 로 주어지므로

$$T_n(s,t) = H(\theta_n)(s - \bar{L}_n) + T_{n,0} \quad (9)$$

가 얻어진다. 단, $\bar{L}_i = \sum_{i=1}^n L_i$ 를 의미한다. 따라서 n 개의 노드에 대해서는

$$T_i(s,t) = H(\theta_i)(s - \bar{L}_i) + T_{i,0}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

과 같이 표현할 수 있다.

식(8)의 θ 에 대한 상미분방정식을 풀 다음 예인선의 시간에 대한 변화각을 식(10)에 대입하여 접선방향의 힘을 계산할 수 있고, 각 노드에서의 접선방향과 법선방향의 힘은

$$\begin{bmatrix} T_{i-1,f} \\ N_{i-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i - \theta_{i-1}) & -\sin(\theta_i - \theta_{i-1}) \\ \sin(\theta_i - \theta_{i-1}) & \cos(\theta_i - \theta_{i-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{i,0} \\ N_i \end{bmatrix} \quad (11)$$

로 얻어진다. 최종적인 예인점에서의 장력은

$$T = \sqrt{T_{1,0}^2 + N_1^2} \quad (12)$$

로 계산 가능하다. 단, Table 2에서 도출한 예인저항은 $R_T = T^*$ 이고, n 번째 노드에서의 접선과 법선방향의 힘 계산에 $N_n = T^* \sin \theta_n, T_{n,f} = T^* \cos \theta_n$ 과 같이 사용된다. 즉, 2.1절에서 계산한 예인저항 값이 장력 계산에 연계되어 적용되는 것이다.

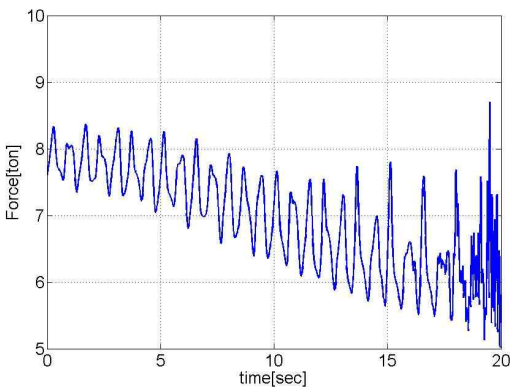


Fig. 3 Towline force by applying node analysis

Fig.3은 실습선 새유달호를 5 kt 속력으로 예인할 경우 계산되는 예인저항 5.5 ton을 초기 예인저항(Table 2의 계산 결과)으로 설정하고 예인선에 걸리는 부가저항을 계산한 결과를

나타내고 있다.

예인선의 길이를 90m, 노드를 3 개로 나누어 노드와 노드 사이의 길이는 30 m로 설정하였고, 예인선의 단위 길이 당 질량은 1.13[kg], 직경은 0.1[m]로 하였다. 예인 초기에 약 8 톤 정도의 장력이 걸리고 시간이 지나면서 초기 예인저항에 수렴해가고 있는 것을 알 수 있다.

3. 소요 예인 마력 계측 실험

3.1 예인 저항 계측 실험

2장에서 살펴본 이론적인 계산 결과의 유용성을 판단하기 위해 목포해양대학교 실습선 새유달호를 대상으로 실제 예인 실험을 수행하였다. 실험일자는 2014년 3월 17일 불무기도 묘박지 해역(Fig. 4 참조)에서 예인선 국제1호(총톤수 124 톤, 출력 1400 PS)를 이용하여 예인하면서 로드셀을 사용하여 예인력을 계측하였다.

실제 선박의 예인저항을 계측하기 위하여 피 예인선(새유달호)에 로드셀을 설치하였다. 로드셀의 측정범위는 20톤(tf)이며, 정격 출력은 $2.0 \text{ mV/V} \pm 0.2\%$, 여자전압은 DC 10V이다. 예인선은 선수부 정중양에 위치한 파나마 초크를 통해 예인선의 원치와 연결하였고, 예인선에 비치된 직경 100mm의 폴리프로필렌 로프를 사용하였다.

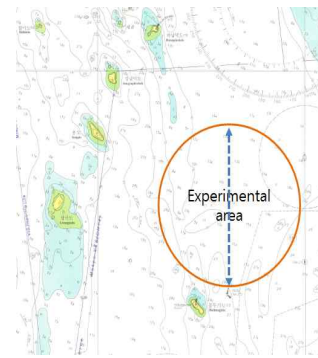


Fig. 4 Experimental area

Fig. 4의 해역에서 Fig. 5와 같이 선수 방향에서 예인선이 실습선을 예인하면서 시간, 예인 속도, 선수방위, 풍향·풍속, 수심, 예인력을 계측하였다.

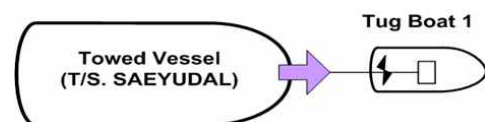


Fig. 5 Towing by ahead

에인 속력과 선수방위 및 수심은 지시계 값을 손으로 기록하였으며, 나머지 데이터는 A/D모듈을 통해 디지털 값으로 저장하였다. 에인력의 계측에는 로드셀을 사용하였고, 데이터를 계측하기 위한 시스템의 구성은 Fig. 6과 같다.

로드셀로부터의 데이터는 NI9219모듈을 이용하여 디지털 값으로 변환하여 C-DAQ를 통해 컴퓨터에 저장하고, 시간, 풍향·풍속 및 AIS신호는 컴퓨터에 곧바로 저장할 수 있도록 하였다. 로드셀에 걸리는 하중은 풀브리지(full bridge)를 적용하여 감도를 높여서 계측하였고, 샘플링레이트는 10S/s로 설정하였다.

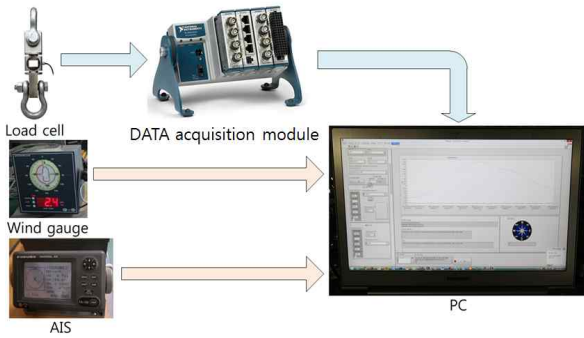


Fig. 6 Components of data acquisition system

에인실험을 수행하면서 측정해야 하는 데이터 값을 일목요연하게 디스플레이하고, 디지털 값으로 변환된 데이터를 텍스트 형식으로 저장할 수 있는 GUI를 Fig.7과 같이 구성하였다.

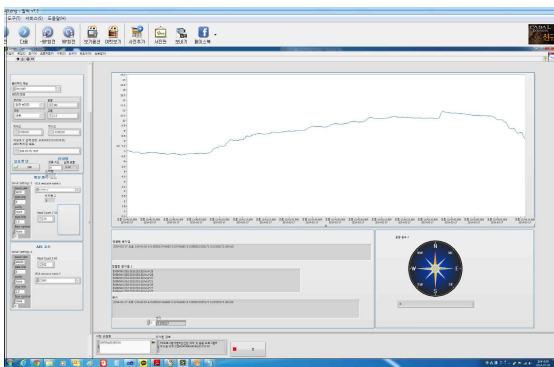


Fig. 7 GUI for data acquisition

Fig. 8은 피 에인선(실습선)을 선수방향에서 에인하는 실험 사진을 나타내고 있으며, 계측 데이터의 정확성을 위해 실습선과 데이터 저장 컴퓨터와의 시간을 동기화 하였으며 정지 상태에서 5노트($\approx 2.5m/s$)까지 단계별로 속력을 증가시켜 계측하였다.



Fig.8 Experimental photos of towing

3.2 에인력 계측 데이터의 분석

실험 해역에서 Fig.5와 같이 실습선을 선수방향에서 에인하여 계측된 에인력 데이터는 Fig. 9와 같다.

Fig. 9의 좌측 세로축은 로드셀에서 계측된 에인력을 나타내고 있다. 실험 시의 풍향은 남풍이었으며, 풍속은 계측된 데이터의 평균치를 바탕으로 약 $7m/s$ 이었다. 파고는 약 $0.5m$ 의 조건이었다.

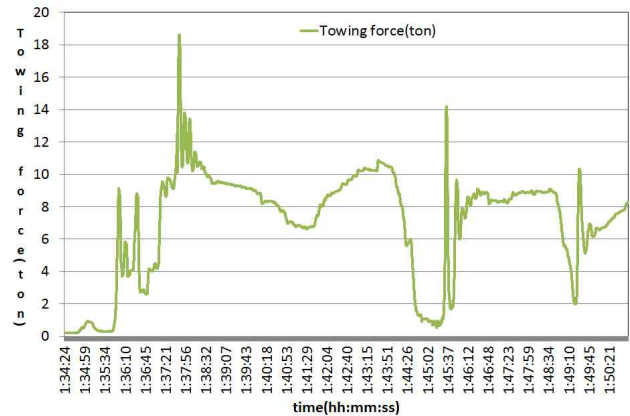


Fig. 9 Experimental results

Fig. 9의 데이터는 13시 34분 24초부터 13시 50분 21초 까지 약 16분 동안 측정된 에인력을 나타내고 있으며, 13시 37분에 약 18톤의 최대값을 나타내고 있다. 13시 44분~45분 사이에는 에인삭을 늦춘 관계로 0에 가까운 값을 보이고 있으며, 13시 46분부터 48분 사이에는 다시 에인에 의한 에인력이 정상적으로 나타나고 있다. 피크값을 보이는 부분을 제외한 정상상태(status state) 즉, 13시 38분~48분, 13시 46분~48분 사이에는 6톤~10톤 사이의 에인력을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. Fig.10은 Fig.9로부터 정상상태에 해당하는 13시 38분으로부터 42분까지의 데이터를 나타내고 있다.

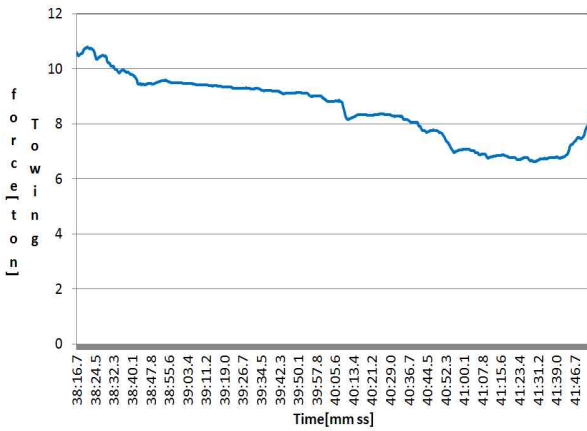


Fig.10 Towing force in the status state

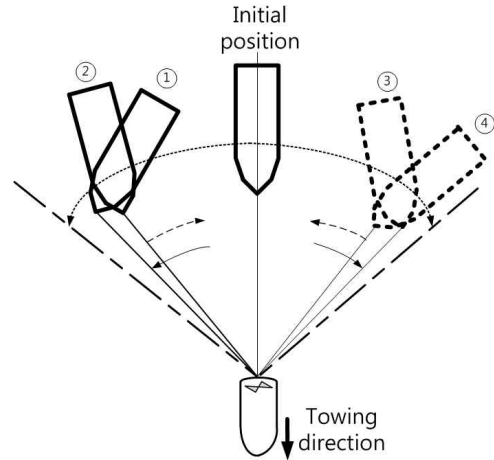


Fig.12 Swing and yawing of towed vessel

Fig. 11은 계측된 예인장력 계산값을 예인속력, 선수방위와 함께 나타낸 것이다. 가로축은 계측 시간, 좌측 세로축은 선수방위, 우측 세로축은 예인장력과 피예인선의 선속을 의미한다.

참고로 예인속력과 선수방위는 수기로 기록하였고, 선수방위의 경우 13시 40분 이후의 값만을 나타내고 있다. 장력의 경우 컴퓨터에 저장된 데이터를 수기로 기록한 시점에 맞추어 출력한 것이다. 즉, Fig. 9의 값을 예인속력과 선수방위 기록시점과 동기화 한 것이다.

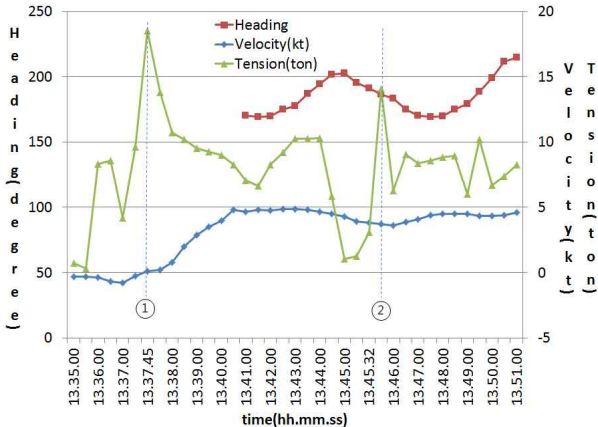


Fig.11 Towing force with ship's velocity and heading

전체 실험 구간에서 피크치를 보이고 있는 곳은 ①지점과 ②지점이다. ①지점의 예인속력을 보면 피예인선이 예인방향으로 움직이기 시작하는 지점인 것을 알 수 있다. 즉, 정지마찰 저항이 최대가 되는 지점인 것을 알 수 있고 18톤에 가까운 값을 보이고 있다. ②지점 직전에 예인 장력 값이 급격하게 줄어든 것은 예인선에서 예인삭을 잠시 풀었기 때문이다. 선속이 줄어들지 않은 것은 관성에 의한 영향이고, ②지점부터 다시 속도가 올라가고 있으며 14톤의 예인력이 계측된 것을 알 수 있다.

1) 13시 35분부터 40분까지의 선수방위 데이터가 누락됨

①과 ②지점에서 예인력이 급격하게 상승하는 것은 스윙(swing)과 요잉(yawing)에 의한 피예인선의 자세와도 관련이 되어 있다. Fig. 12는 예인 시 피예인선의 자세 변화를 나타낸 개략도이다. Fig. 11의 결과값으로부터 예인실험 시 ± 20 도의 선수방위 변화가 있는 것을 알 수 있고, ②지점은 Fig. 12의 ②에 대응된다. 예인초기에 나타나는 최대예인장력값은 ①과 같은 자세로 판단된다.

예인선과 피예인선이 일직선상일 때와 비교하여 ①과 ②에서는 선체측면에 가해지는 바람의 저항과 유압력의 증가에 따른 예인저항이 급격하게 증가하고 있는 것이다. 본 실험결과에서는 짧은 시간 동안의 선수방위값과 선속을 수기로 기록하여 전체적인 경향을 파악하기에는 부족한 부분이 있지만 스윙과 요잉에 의한 영향으로 ③과 ④의 자세에서도 예인저항이 최대가 나타날 것으로 예측된다.

3.3 스윙 모션의 영향

Fig. 3의 예인장력 계산 결과는 6톤~8.5톤의 장력 변화를 나타내고 있고, Fig.10의 정상 상태의 실험결과와 비교하면 최대 1.5톤 정도의 오차를 보이고 있다. Fig. 3의 이론적인 예인력의 계산 과정에서는 피 예인선박이 일정한 직선방향으로 예인되고 있는 것을 가정하고 있으나 실제 선박을 예인할 경우 피 예인선은 조류 및 바람의 영향으로 인해 일직선상으로 예인이 되지 않고 좌우로 움직이는 요잉 또는 스윙 모션(yawing or swing motion)을 일으키게 된다. 따라서 Fig. 3과 Fig. 10의 오차는 이러한 스윙 및 요잉으로 인한 장력의 변화로 인한 것으로 고려할 수 있고, 이러한 부분을 장력계산에 반영할 경우 오차값을 줄일 수 있을 것이다.

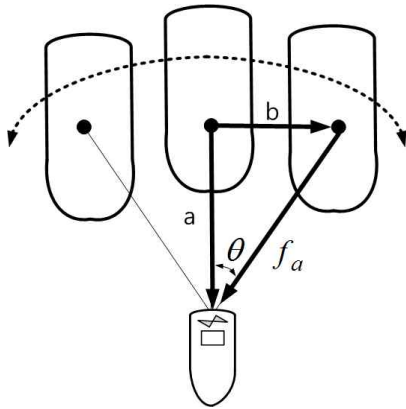


Fig.13 Yawing motion of ship

Fig. 13은 스윙에 의한 피에인선의 움직임을 나타내고 있으며 실제 예인 시 피에인선은 직선적인 거동이 아닌 그림과 같은 거동을 나타낸다. 이러한 이유는 예인선에 의한 힘의 작용선이 항상 피 예인선과 직선적으로 일치하지 못하고, 피 예인선에 작용하는 다양한 외력에 의해 좌우로 움직일 수 있는 힘이 b 방향으로 나타나기 때문이다. 이러한 b 방향의 힘이 작용하지 않는다면 예인선과 피 예인선은 항상 일치선상의 예인상태를 유지할 수 있을 것이다. 초기 예인 시 외력에 의한 힘은 $b = a \tan \theta$ 로 구할 수 있고, 이러한 경우 초기 예인력 a 는 f_a 로 변화되게 된다.

예를 들어 각도가 $\theta = 30^\circ$ 로 가정할 경우 Table 2의 $R_T \cong 5.5[\text{ton}]$ 은 $R_T = 6.3[\text{ton}]$ 으로 커지게 된다. Fig. 12는 선박의 전체 저항값 $R_T = 6.3 [\text{ton}]$ 일 경우 예인선의 부가장력을 노드 분석법을 적용하여 계산한 결과값을 나타내고 있다.

전체 장력의 변화는 6톤~9.5톤을 보이고 있고, 실제 실험결과 Fig.10과 비교하면 전체적으로 유사한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

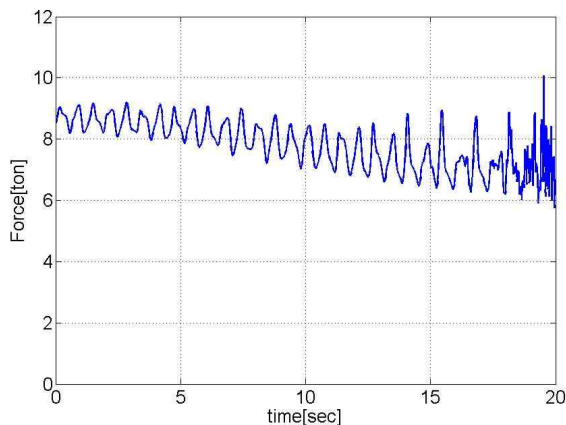


Fig.14 Towing force of towline with $R_T = 6.3[\text{ton}]$

다만 본 절에서의 분석하고 있는 스윙 모션은 힘의 평형이

불균형을 이루는 일정 지점의 값을 기준으로 하고 있는 것으로 동적인 요소들을 전체적으로 반영하지는 못한다.

아울러 실제 실험결과 Fig.9의 13시 37분과 13시 45분에 나타나고 있는 18톤과 14톤의 피크값에 대해서는 이론적인 뒷받침을 하지 못하고 있다. 이는 본 연구의 결과가 피 예인선의 정적인 저항값과 예인선의 동적인 요소들을 고려하고 있지만 피 예인선과 예인선의 상호 역학적인 운동 관계를 전체적으로 고려하고 있지 못한 때문인 것으로 해석된다. 이에 대해서는 피 예인선과 예인선의 모델링에 근거한 거동해석이 이루어질 경우 상호 관계를 좀 더 명확하게 규명할 수 있으리라 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 선박의 예인 시 필요한 예인력을 계산하기 위해 선체저항, 공기저항, 조파저항 및 프로펠러 고착저항을 고려하여 저항값을 계산하였고, 노드 분석법을 적용하여 예인선에 걸리는 부가저항을 계산하여 최종적인 예인력을 도출하였다. 아울러 도출된 계산 결과값의 유효성을 검증하기 위해 실선을 대상으로 예인력을 계측하였고, 계산결과와 실험결과를 비교 분석하였으며 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

먼저, 이론적인 예인저항 계산에 있어서 예인속력은 예인저항을 결정하는 주요한 요소임을 확인하였다.

다음으로 자력운항이 불가능한 상태로 가정해서 얻어지는 프로펠러 고착저항은 사고 선박의 예인 저항을 계산하는 주요한 요소라고 할 수 있을 것이다. 계산 결과에서도 일정 속도 이상의 예인이 이루어질 경우 프로펠러 고착에 의한 저항이 주요한 성분이 되는 것을 확인할 수 있었다.

또한 예인선의 동적인 변화를 고려할 수 있는 노드분석법의 경우 예인선에 작용하는 부가적인 장력을 충실하게 표현할 수 있었다.

실제 실험을 통해 부가적인 외력에 의해 피 예인선의 거동이 직선적이 아닌 좌우로 움직이는 스윙 모션을 나타내는 것을 확인하였고, 이론적인 예인력 계산 시 이러한 움직임을 고려함으로써 실제 실험치와의 오차를 줄일 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

예인 초기에 나타나고 있는 급격한 피크치는 예인속력을 점진적으로 변화시킴으로써 최대값을 줄일 수 있을 것으로 판단되고, 이러한 피크치는 예인선의 파단강도와도 밀접한 관련을 맺고 있으므로 예인선 운용에서 주의할 부분으로 사료된다. 예인 초기의 급격한 예인력의 동적 변화는 피 예인선과 예인선의 동역학 모델을 고려한 거동 해석이 필요할 것으로 생각되며 이러한 부분에 대해서는 향후 추가적인 연구가 필요할 것 같다.

후 기

본 연구는 해양수산부 소관 연구개발 사업“ 지능형 해양 사고 예방 및 구난 기술 개발-사고선박 예인 지원 요소 기술 및 구난체계 개선연구(No. D10811511H360000170) ”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] Choi, H.J, Kim, E.C(2012), "Development of the ship resistance calculation program for prediction of towing forces for damaged ships", Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, Vol. 15, No. 2. pp. 150-155.
- [2] KR, KST(2008), "A study on the safety management policy for large tug and barge", MOMAF, pp. 4-20.
- [3] M.A. Vaz, M.H. Patel(1995), "Transient behavior of towed marine cables in two dimensions", Applied Ocean Research, 17, pp. 143-153.
- [4] Nam.T.K, Jung, C.H, Jeong.J.S(2012), "A Study on the calculation of resistance of the ship to be towed and towline tension", Journal of Navigation and Port Research, Vol. 36, No. 8, pp. 607-612.
- [5] The Society of Naval Architects of Korea(2009), "Ship's resistance and propulsion", Jisung Publishing Co., pp. 16-86.
- [6] U.S.Navy Towing Manual(2002), U.S.Naval Sea Systems Command, SL740-AA-MAN-010.

원고접수일 : 2014년 7월 8일
심사완료일 : 2014년 9월 30일
원고채택일 : 2014년 10월 2일